

Комплексы КЕНТАВР – универсальная аппаратура для контроля и измерения нейтронно-физических параметров РБМК

А.Н. Кузьмин, В.М. Качанов, В.Е. Житарев. РНЦ «Курчатовский институт»
Г.Н. Алексаков, В.П. Алферов, А.В. Кудрявцев, В.А. Федоров. МИФИ
Г.П. Кириченко. УГП НТЦ «Теплоэнерготехника»

Введение

Определение паспортных нейтронно-физических характеристик реакторов РБМК, как правило, связано с измерением реактивности. Для этого в критическом состоянии осуществляется изменение параметра, влияние которого на реактивность исследуется, а вносимая реактивность определяется в результате обработки показаний нейтронных камер методом обращенного решения уравнений точечной кинетики [1]. При таких измерениях существенным, с точки зрения получаемого результата, является целый ряд моментов, в частности величина вносимого возмущения, а также число и место расположения камер.

Длительное время для измерения реактивности методом обращенного решения уравнений точечной кинетики на реакторах РБМК использовали аналогово-цифровые реактиметры. При проведении экспериментов в процессе физического пуска на «холодном» реакторе в реактиметре обрабатывался суммарный токовый сигнал четырех нейтронных камер, установленных в осушенные технологические каналы активной зоны. Для измерения реактивности работающего на мощности реактора использовали суммарный сигнал штатных камер, расположенных за границей активной зоны. С 1983 года на реакторах РБМК-1500 Игналинской АЭС в качестве штатных боковых датчиков стали применять подвески с тремя, разнесенными по высоте, камерами в каждом канале. В дальнейшем и при проведении измерений на остановленных и расхолаженных реакторах РБМК-1000 стали использовать суммарный сигнал четырех трехкамерных подвесок, устанавливаемых в осушенные каналы активной зоны. Такой подход стал давать более достоверные значения реактивности, позволяя лучше учитывать в измерениях аксиальную неоднородность нейтронного поля в реакторе.

В 1989 году при физическом пуске реактора третьего блока Смоленской АЭС впервые был использован измерительно-вычислительный комплекс «Кентавр-АЭС», позволивший провести измерения плотности потока нейтронов в 74 точках по объему активной зоны. Микро ЭВМ, входившая в состав этой аппаратуры, давала возможность оперативно проводить обработку токовых сигналов нейтронных камер для получения значений реактивности и использовать различные подходы для учета пространственных эффектов. Принципы, реализованные в комплексе «Кентавр-АЭС», были опробованы и отработаны в комплексе «Кентавр-КС» в течение нескольких лет до этого успешно применяемом в экспериментах на критических уран-графитовых стендах РНЦ «Курчатовский институт» [2, 3, 4]. В дальнейшем комплекс «Кентавр-АЭС» успешно использовался в экспериментах во время плановых остановок реакторов Смоленской, Ленинградской и Курской АЭС [5]. Для возможности проведения измерений в условиях интенсивного гамма излучения, присутствующего после останова и расхолаживания реактора, в состав системы был введен блок усилителей, работающих в импульсно-флуктуационном режиме с камерами, располагаемыми в центральных гильзах датчиков контроля энерговыделения по высоте. Проводились измерения и на работающих в энергетическом режиме реакторах Курской и Смоленской АЭС с использованием сигналов серебряных бета-эмиссионных детекторов нейтронов штатной системы физического контроля распределений

энерговыведения (СФКРЭ). В настоящее время новые модификации измерительно-вычислительных комплексов «Кентавр» используются при проведении измерений основных нейтронно-физических параметров реакторов в холодном состоянии [6, 7]. В качестве датчиков применяются высокочувствительные камеры деления, устанавливаемые в центральные несущие трубки тепловыделяющих сборок (ТВС.)

Рассматривается вопрос о создании на базе последних модификаций аппаратуры «Кентавр» системы контроля подкритичности (СКП-КЕНТАВР), позволяющей постоянно контролировать период роста нейтронного потока в процессе вывода реактора на минимальный контролируемый уровень мощности, используя внутризонные камеры деления. Как и ранее, эта аппаратура будет обеспечивать измерение реактивности.

Данный доклад представляет результаты экспериментов, выполненных с помощью комплексов «Кентавр» на критическом стенде РБМК и реакторах РБМК, а также определяет основные принципы построения СКП-КЕНТАВР.

1. Аппаратура «Кентавр» на стенде РБМК

С 1988 года на критическом стенде РБМК используется комплекс «Кентавр-КС». Эта аппаратура позволяет проводить измерение и обработку пространственных распределений плотности потока нейтронов в стационарном состоянии и в процессе введения стержней СУЗ или выхода в критическое состояние. Комплекс состоит из 68 линейных измерительных каналов с малогабаритными камерами деления и персонального компьютера. Измерительные каналы работают в токовом режиме и обеспечивают измерение нейтронного потока $\sim(10^5 \dots 10^7)$ н/(см²·с). Камеры деления располагаются в специальных каналах в углах элементарных ячеек графитовой кладки. Две гирлянды по 7 камер используются для измерения высотных распределений, а 56 камер для измерения радиального нейтронного поля. При нестационарных измерениях с помощью компьютера рассчитывается введенная реактивность в результате решения уравнений точечной кинетики в приближении шести групп запаздывающих нейтронов урана-235. При этом, есть возможность использовать различные подходы для учета пространственных эффектов [8]. Реактивность определяется по суммарному сигналу камер (ρ^Σ), по суммарному сигналу с учетом ценности нейтронов, равной потоку нейтронов в исходном критическом состоянии (ρ^Σ_0) или в каждый текущий момент времени (ρ^Σ_t), а также путем усреднения реактивностей по отдельным камерам ($\bar{\rho}$) и усреднения реактивностей отдельных камер после введения поправки на изменение формы нейтронного поля ($\bar{\rho}^0$).

В таблице 1 приведены результаты измерения реактивности в диапазоне от +0.25 $\beta_{эф}$ до -4.25 $\beta_{эф}$ на сборке в виде фрагмента начальной загрузки реактора РБМК из 256 каналов. Измерения выполнены комплексом «Кентавр-КС» с использованием перечисленных подходов и реактиметром, на который подавался суммарный сигнал четырех камер, расположенных в боковом отражателе. Даны среднеквадратические погрешности результатов в виде +0.246(2)=0.246±0.002. Отметим, что при измерении отрицательной реактивности $\geq 1 \beta_{эф}$ результаты, полученные по отдельным камерам активной зоны или отражателя, могут отличаться в 2...4 раза.

Видно, что все подходы, используемые в комплексе «Кентавр-КС» для учета пространственных эффектов, дают близкие величины отрицательной реактивности. Отличие между значениями отрицательной реактивности по реактиметру и комплексу «Кентавр-КС» может достигать $\approx(10 \dots 30)$ %. Положительные реактивности практически равны во всех случаях.

Таблица 1

Результаты измерений реактивности ($\beta_{эф}$) комплексом «Кентавр-КС» и реактиметром на стенде РБМК

№	«Кентавр-КС»					Реактиметр
	ρ_t^{Σ}	ρ_0^{Σ}	ρ_t^{Σ}	$\bar{\rho}$	$\bar{\rho}^{\Phi}$	
1	+0.246(2)	+0.246(2)	+0.246(2)	+0.240(2)	+0.239(3)	+0.243(2)
2	-0.169(2)	-0.169(2)	-0.168(2)	-0.169(5)	-0.162(4)	-0.189(2)
3	-0.495(5)	-0.491(5)	-0.492(5)	-0.493(12)	-0.487(4)	-0.485(5)
4	-0.615(6)	-0.612(6)	-0.587(6)	-0.663(29)	-0.615(4)	-0.717(7)
5	-1.12(1)	-1.15(1)	-1.11(1)	-1.13(3)	-1.120(5)	-1.00(1)
6	-4.25(5)	-4.32(5)	-4.15(5)	-4.40(14)	-4.30(1)	-5.54(6)

2. Использование аппаратуры «Кентавр» на реакторах РБМК

Комплекс «Кентавр-АЭС» был изготовлен для проведения измерений во время физического пуска реактора третьего блока Смоленской АЭС. Этот комплекс состоял из 74 линейных измерительных каналов с малогабаритными камерами деления, 8 широкодиапазонных логарифмических каналов с высокочувствительными камерами деления и микро ЭВМ. Сорок два линейных измерительных канала использовались для 6 высотных гирлянд по 7 камер в каждой, а тридцать два – с камерами для измерения радиального нейтронного поля. Линейные измерительные каналы работали в токовом режиме и обеспечивали измерение нейтронного потока $\approx(10^7 \dots 10^9)$ н/(см²·с) при мощности гамма-излучения до $\approx 0.5 \cdot 10^3$ р/ч. Логарифмические каналы работали в импульсно-флуктуационном режиме и могли использоваться для измерений в подкритическом и критическом состояниях в диапазоне нейтронного полтока $\approx(10 \dots 10^9)$ н/(см²·с) в гамма полях до $\approx 10^5$ р/ч.

Во время физического пуска с помощью комплекса «Кентавр-АЭС» был выполнен большой объем измерений. При формировании начальной загрузки реактора проводились измерения стационарных полей нейтронов в критическом состоянии. Впервые было выполнено измерение стационарного распределения нейтронов по высоте подкритического реактора. Оказалось, что максимум подкритического высотного поля на ≈ 1 м выше критического максимума (рис. 1). При этом наблюдается большая неравномерность по высоте, чем в критическом состоянии. Проводились измерения нестационарных полей нейтронов по объёму реактора при введении из критического состояния различного числа стержней ручных регуляторов (РР), стержней быстродействующей аварийной защиты (БАЗ) и одновременном перемещении на 0.5 м всех укороченных стержней поглотителей. Пример деформации (в виде отклонения от первоначального вида в критическом состоянии) высотного поля нейтронов при сбросе 33 РР приведен на рисунке 2. Видно, что при вводе стержней высотное поле в начале смещается в нижнюю часть активной зоны, затем возвращается к исходному виду, а при подходе стержней к нижнему концевому начинает смещаться

вверх, принимая со временем форму стационарного подкритического нейтронного поля.

При нестационарных измерениях с помощью микро ЭВМ, используя методику реализованную на стенде РБМК, вычислялась введенная реактивность. Значения реактивности по отдельным камерам комплекса «Кентавр-АЭС» могли отличаться в 2...3 раза и при обработке данных использовались те же подходы для учета пространственных эффектов. Одновременно проводились измерения реактивности с помощью реактиметра, на который подавался суммарный сигнал четырёх трехкамерных подвесок установленных в активной зоне. Некоторые результаты измерений подкритичности при сбросе извлеченных стержней РР и добросе стержней БАЗ приведены в таблице 2. Для данных, полученных по комплексу «Кентавр-АЭС», даны среднеквадратические погрешности воспроизводимости результатов, для реактиметра – принятая методическая погрешность измерения.

Видно, что подходы, используемые в комплексе «Кентавр-АЭС» для учета пространственных эффектов, дают близкие результаты. Реактиметр с 12 внутризонными камерами дает удовлетворительное совпадение с результатами комплекса «Кентавр-АЭС» при вводе стержней РР (эксперименты №№1...4) – отличие не более $\approx 7\%$. Но при добросе стержней БАЗ (эксперименты №№5...7) отличие достигает $\approx (9...17)\%$.

Таблица 2

Результаты измерения подкритичности ($\beta_{\text{эф}}$) комплексом «Кентавр-АЭС» и реактиметром на реакторе третьего блока Смоленской АЭС

№	«Кентавр-АЭС»					Реактиметр
	$\rho_{\Sigma t}^{\Sigma}$	$\rho_{\Sigma 0}^{\Sigma}$	$\rho_{\Sigma t}^{\Sigma}$	$\bar{\rho}$	$\bar{\rho}^{\Phi}$	
1	2.04(2)	2.04(2)	2.03(2)	2.08(4)	2.03(1)	1.9(1)
2	2.81(3)	2.82(3)	2.79(3)	2.77(5)	2.80(1)	2.7(1)
3	5.49(5)	5.78(5)	5.43(5)	5.62(21)	5.48(3)	5.6(2)
4	6.45(6)	7.04(6)	6.73(6)	6.29(17)	6.48(3)	6.4(3)
5	4.80(5)	4.80(5)	4.72(5)	5.05(19)	4.79(1)	4.1(2)
6	5.42(5)	5.57(5)	5.48(5)	5.41(14)	5.45(2)	5.0(2)
7	10.87(11)	11.75(12)	10.83(11)	-	-	9.8(4)

В 1991 году комплексом «Кентавр-АЭС» были выполнены измерения эффективности 21 стержня БАЗ на реакторе первого блока Курской АЭС, работающем на мощности $\approx 50\%$. В этих измерениях использовали сигналы серебряных бета-эмиссионных датчиков нейтронов СФКРЭ. Специальная расчетная программа позволяла учитывать инерционные составляющие сигналов этих датчиков с учетом различного выгорания изотопов серебра и оперативно получать реальные данные о деформации полей нейтронов во времени. При проведении экспериментов в комплекс «Кентавр-АЭС» вводились: суммарный сигнал всех 128 радиальных датчиков контроля энерговыделения (ДКЭР), отдельные сигналы 32 ДКЭР, а также отдельные сигналы 4 штатных боковых ионизационных камер (БИК). Одновременно проводилось измерение реактивности с помощью реактиметра по суммарному сигналу двух других штатных БИК. При вычислении реактивности использовалась методика обращенного уравнения

точечной кинетики в приближении 6 групп запаздывающих нейтронов урана-235. В данном случае для топлива с выгоранием ≈ 11 МВт·сут./кгU такой подход систематически завышает подкритичность на ≈ 3.6 %, что укладывается в принятую погрешность измерения реактивности, равную ≈ 5 %. Отличие значений реактивности по отдельным ДКЭР достигало ≈ 3 раз, а по отдельным БИК ≈ 30 % и при обработке данных использовались примененные ранее подходы для учета пространственных эффектов. Кроме того, так как эксперименты проводились на мощности ≈ 50 %, в полученные значения реактивности вводилась поправка на обратную связь по мощности. Результаты измерения эффективности 21 стержня БАЗ комплексом «Кентавр-АЭС» и реактиметром до (ρ) и после (ρ_{oc}) введения поправки на обратную связь по мощности представлены в таблице 3. Даны среднеквадратические погрешности воспроизводимости результатов.

Видно, что эффективность стержней БАЗ, определенная в комплексе «Кентавр-АЭС» по суммарному сигналу 128 ДКЭР, по сигналу 32 ДКЭР с использованием различных подходов, учитывающих пространственные эффекты, и по сигналам четырех БИК после введения поправки на изменение формы нейтронного поля практически равны между собой. Учет обратных связей по мощности увеличивает эффективность стержней БАЗ на $\approx (7..12)$ % и ещё более сближает результаты. Значения, полученные по реактиметру, на ≈ 14 % меньше результатов комплекса «Кентавр-АЭС» с ДКЭР и в пределах погрешности совпадает с результатом по 4 БИК комплекса до введения в него поправки на изменение формы поля.

Таблица 3

Результаты измерения эффективности (β_{ϕ}) 21 стержня БАЗ (до/после введения поправки на обратную связь по мощности) на реакторе первого блока Курской АЭС

Число, тип камер	«Кентавр-АЭС»					Реактиметр $\rho^{\Sigma} / \rho^{\Sigma}_{oc}$
	$\rho^{\Sigma} / \rho^{\Sigma}_{oc}$	$\rho^{\Sigma}_0 / \rho^{\Sigma}_{0,oc}$	$\rho^{\Sigma}_t / \rho^{\Sigma}_{t,oc}$	$\bar{\rho} / \bar{\rho}_{oc}$	$\bar{\rho}^{\phi} / \bar{\rho}^{\phi}_{oc}$	
128 ДКЭР	1.67(9)/1.84(8)	-	-	-	-	-
32 ДКЭР	1.67(10)/1.84(6)	1.72(10)/-	1.65(10)/-	1.76(10)/-	1.67(2)/1.85(8)	-
4 БИК	-	-	-	1.50(9)/1.68(9)	1.73(5)/1.86(11)	-
2 БИК	-	-	-	-	-	1.46(5)/1.64(1)

Во всех трех рассмотренных сериях экспериментов с числом нейтронных камер ≥ 70 рассмотренные методы учета пространственных эффектов дают близкие результаты. Обычно, при измерении реактивности на реакторе используется ≤ 12 нейтронных камер. Не всегда удается расположить эти камеры в пределах активной зоны. При таких условиях суммарный сигнал камер не является пропорциональным полной мощности реактора и вклад пространственных эффектов для всех рассмотренных методов возрастает. Оценка погрешности реактивности за счет пространственных эффектов в зависимости от числа нейтронных камер дана в следующем разделе.

3. Погрешность измеряемой реактивности за счет пространственных эффектов

Представленные результаты экспериментов, выполненных на стенде РБМК, Смоленской АЭС и Курской АЭС, были использованы для оценки пространственной составляющей погрешности реактивности в зависимости от числа используемых камер.

Для этого был проведен анализ результатов измерения подкритичности разным числом камер при различных вариантах расположения одного и того же числа камер по активной зоне (таблица 4).

Таблица 4

Рассмотренные варианты для оценки пространственной погрешности реактивности

Эксперимент	Число сбрасываемых стержней СУЗ	Подкритичность, $\beta_{эф}$	Полное число камер	Количество вариантов с разным числом камер (число камер)	Количество вариантов расположения камер
Стенд РБМК	15	4.3	68	15(2-68)	2-12
Смоленская АЭС	33	2.0	69	11(10-65)	5-6
Курская АЭС	21	1.8	128	9(2-32)	1-10

При этом вычислялись три типа параметров:

$\delta\rho_n$ – диапазон возможных значений реактивности при использовании суммарного сигнала n камер (ρ_n^Σ) относительно усредненного по всем вариантам расположения этих камер значения реактивности ($\bar{\rho}_n^\Sigma$);

$\delta\rho_{n\Sigma}$ – отклонение реактивности по суммарному сигналу n камер (ρ_n^Σ) от реактивности по суммарному сигналу всех имеющихся камер (ρ^Σ);

$\delta\rho_{nф}$ – отклонение средней реактивности по n камерам после введения поправки на изменение формы нейтронного поля ($\rho_n^ф$) от реактивности по суммарному сигналу всех имеющихся камер (ρ^Σ).

Для каждого числа камер были определены максимальные значения $\delta\rho_n$, $\delta\rho_{n\Sigma}$, $\delta\rho_{nф}$ среди всех вариантов расположения камер. Полученные результаты для критического стенда и Курской АЭС представлены на рисунке 3. Результаты для Смоленской АЭС практически повторяют зависимости полученные для критического стенда. Видно, что при использовании четырех трехкамерных подвесок диапазон возможных значений реактивности $(\delta\rho_n)_{max}$ может составлять $\approx 15\%$ для холодной свежей загрузки и $\approx 40\%$ для работающего на мощности реактора с выгоревшей загрузкой. При этом максимальное отклонение реактивности по суммарному сигналу 12 камер от реактивности по суммарному всех камер $(\delta\rho_{n\Sigma})_{max}$ составляет $\approx 10\%$ для холодной невыгоревшей загрузки и $\approx 25\%$ для выгоревшего реактора на мощности. На первый взгляд, метод учета пространственных эффектов с помощью поправки на изменение формы поля является весьма эффективным. Величина $(\delta\rho_{nф})_{max}$ во всех рассмотренных случаях для холодной невыгоревшей загрузки не превышает $\approx 2\%$, а для выгоревшего реактора на мощности – $\approx 5\%$. Но условием эффективного применения метода поправки на изменение формы поля является возможность нормировки сигналов камер на сигнал пропорциональный интегральному потоку нейтронов по активной зоне, в рассмотренных случаях на сигнал ≥ 70 камер подключенных к комплексу «Кентавр».

При проведении экспериментов на остановленном расхоложенном реакторе штатные датчики СФКРЭ не работают и поэтому реализация этого условия не является возможным. Когда это возможно, т.е. при работе СФКРЭ для получения того же результата достаточно использовать просто суммарный сигнал этих датчиков.

Используя величины $(\delta\rho_n)_{\max}$ и подход предложенный в работе [9] были определены среднеквадратические пространственные погрешности при измерении реактивности по суммарному сигналу камер. Полученные результаты представлены на рисунке 4. Видно, что результаты для стенда РБМК с фрагментом начальной загрузки реактора из 256 каналов и холодного реактора Смоленской АЭС со свежей загрузкой активной зоны близки между собой. Для работающего в энергетическом режиме реактора Курской АЭС с выгоревшей загрузкой среднеквадратическая пространственная погрешность увеличивается ≈ 2 раза. Напомним, что при обработке последних результатов проводилось восстановление инерционных составляющих сигналов датчиков СФКРЭ и вводилась поправка на обратную связь по мощности. Для получения среднеквадратической пространственной погрешности $\approx 5\%$ необходимо использовать ≈ 10 камер для холодного невыгоревшего реактора и $\approx 25 \dots 30$ камер для выгоревшего реактора на мощности. При использовании суммарного сигнала четырех трехкамерных подвесок среднеквадратическая пространственная составляющая погрешности реактивности может составлять от 4% до 11% в зависимости от состояния реактора. Отметим, что все приведенные в данном разделе оценки сделаны для внутризонного расположения камер.

4. Использование расчетных поправок на пространственные эффекты

При использовании небольшого числа нейтронных камер для снижения погрешностей за счет пространственных эффектов достаточно эффективным является применение расчетных поправок получаемых по нестационарным программам [3]. Такая программа должна непосредственно моделировать эксперимент, т.е. вычислять реактивность по рассчитанным изменениям потоков нейтронов в местах расположения камер, а также вычислять реактивность по интегральному нейтронному потоку всей активной зоны. Для введения поправки на пространственные эффекты необходимо экспериментальную величину реактивности умножить на коэффициент в виде отношения расчетных реактивностей по интегральному сигналу и сигналу камеры. Для реакторов РБМК такой подход реализован на базе нестационарной программы STEPAN [10]. В таблице 5 приведены результаты использования программы STEPAN для введения расчетных поправок на пространственные эффекты при повторном физическом пуске первого блока Курской АЭС после массовой замены технологических каналов в 1997 году. Измерение реактивности выполнялось с помощью комплекса «Кентавр», использовавшего суммарный сигнал 6 внутризонных нейтронных камер, и реактиметра работавшего по суммарному сигналу 3 БИК.

Таблица 5

Результаты экспериментального измерения подкритичности ($\beta_{эф}$) и введения расчетной поправки на пространственные эффекты на реакторе первого блока Курской АЭС

№	Эксперимент	Расчет	Поправленные экспериментальные значения

	Кентавр	Реактметр	Кентавр	Реактиметр	Интегральный реактиметр	Кентавр	Реактиметр
1	2.22	1.6	2.09	1.62	2.30	2.44	2.27
2	5.93	4.75	5.37	5.08	6.07	6.70	5.68
3	6.60	4.9	5.76	5.12	6.32	7.24	6.05
4	8.96	7.0	7.46	6.62	8.62	10.35	9.11

Видно, что первоначальное отличие экспериментальных значений подкритичности по внутризонным («Кентавр») и боковым (реактиметр) камерам составляет $\approx(25...40)$ %. Введение расчетной поправки на пространственные эффекты уменьшает отличие до $\approx(7...20)$ %. Расчетные подкритичности по интегральному нейтронному потоку всей активной зоны находятся, как правило, между поправленными экспериментальными значениями.

В будущем для оперативного получения экспериментальных результатов с расчетными поправками на пространственные эффекты по программе STEPAN можно использовать компьютер комплекса «Кентавр»

5. Аппаратура СКП-КЕНТАВР

В 1999 году при выводе на мощность реактора четвертого блока Курской АЭС произошло срабатывание быстродействующей аварийной защиты. Расчетное моделирование извлечения стержней СУЗ при выводе реактора в критическое состояние показало, что при выбранном порядке извлечения стержней существенно превышалось максимально допустимое значение коэффициента радиальной неравномерности энерговыделения. Последний извлекаемый стержень имел аномально большой «вес», что привело к большой скорости введения положительной реактивности. При этом величина периода роста нейтронного потока в районе максимума нейтронного поля была значительно меньше, чем в местах расположения датчиков штатных приборов аварийной защиты по скорости нарастания мощности. Для исключения подобных ситуаций был введен целый ряд организационных мер. В качестве технического средства, позволяющего постоянно контролировать ситуацию в процессе вывода реактора на минимальный контролируемый уровень мощности предлагается система контроля подкритичности (СКП) на базе блока обработки сигналов камер (БОСК), опробованного ранее в последних модификациях комплекса «Кентавр».

Предполагается, что аппаратура СКП-КЕНТАВР будет состоять из трех независимых каналов контроля и персонального компьютера. Каждый канал контроля будет обеспечивать сбор и обработку сигналов от шести подвесок камер, устанавливаемых в центральные несущие трубки ТВС. Подвеска камер будет иметь в своем составе одну ионизационную камеру ПИК-5мт, сохраняющую работоспособность до 300 °С. Использование 18 нейтронных камер позволит снизить среднеквадратическую пространственную составляющую погрешность измерения реактивности до ≈ 7 %. Каждый канал контроля будет состоять из блока БОСК и контроллера с приборами, показывающими минимальный по шести камерам период роста нейтронного потока. Персональный компьютер будет осуществлять сбор, обработку и хранение информации. В состав системы планируется включить звуковой индикатор разгона. Система СКП-КЕНТАВР будет сертифицирована и обеспечена методикой и техническими средствами для периодической проверки.

Заключение

Использование в экспериментах на критической сборке и реакторах РБМК многоканальных комплексов «Кентавр» позволило получить разнообразные экспериментальные данные по стационарным и нестационарным полям нейтронов и эффектам реактивности. На основе этих результатов можно проводить комплексную валидацию расчетных программ.

В результате анализа этих результатов была оценена пространственная составляющая погрешности реактивности в зависимости от числа используемых внутризонных камер. Показано, что при использовании штатной методики – суммарного сигнала четырех трехкамерных подвесок - среднеквадратическая пространственная составляющая погрешности реактивности может достигать $\approx 11\%$.

Для уменьшения погрешности реактивности за счет пространственных эффектов достаточно эффективно использование поправок, рассчитанных по нестационарным программам. Для повышения оперативности расчета можно использовать компьютер комплекса «Кентавр».

Дано описание восемнадцати канальной контрольно-измерительной системы на базе аппаратуры «Кентавр», позволяющей контролировать период роста нейтронного потока по показаниям внутризонных камер в процессе вывода реактора на минимальный контролируемый уровень мощности. Использование восемнадцати камер позволят снизить среднеквадратическую пространственную составляющую погрешности реактивности до $\approx 7\%$.

Литература

1. Ю.А. Казанский, Е.С. Матусевич «Экспериментальные методы физики реакторов», Москва, Энергоиздат, 1984, с.93
2. Г.Н. Алексаков, А.В. Кудрявцев, А.Н. Кузьмин и др., «Система «Кентавр» для автоматизации нейтронно-физических экспериментов на уран-графитовых критических стендах», Атомная энергия, 1989, т. 66, в. 3, с.211...213.
3. В.Е. Житарев, В.М. Качанов, А.Н. Кузьмин, «О повышении адекватности измеренных и рассчитанных эффектов реактивности», Тезисы докладов 7-го Всесоюзного семинара по проблемам физики реакторов, 3...7 сентября 1991 г., Москва, ЦНИИАтоминформ, 1991, с.163...165.
4. E.V. Burlakov, F.V. Glembotsky, G.B. Davydova, et. al., "An Analysis of the Experiments with Erbium for the RBMK Design", ANS International Topical Meeting on Advances in Reactor Physics and Mathematics and Computation into the Next Millennium, May 7...12, 2000, Westin William Penn Hotel, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, Proceedings.
5. В.Е. Житарев, В.М. Качанов, А.Н. Кузьмин, «Измерение реактивности на реакторах РБМК с учетом эффектов пространственной кинетики», Тезисы докладов 8-го семинара по проблемам физики реакторов, Москва, МИФИ, б/о «Волга», 5÷9 сентября 1993 г, т. 2, с.44÷46.
6. Г.Н. Алексаков, В.А. Федоров, А.В. Кудрявцев и др., «Система автоматизации измерений физических характеристик энергоблоков АЭС с реакторами РБМК-1000 «Кентавр-6К»», Тезисы докладов 8-го семинара по проблемам физики реакторов, Москва, МИФИ, б/о «Волга», 5...9 сентября 1993 г, т. 1, с.195...196.
7. Г.Н. Алексаков, А.В. Кудрявцев, Ю.А. Лапшиков и др., «Опыт эксплуатации системы автоматизации измерений «Кентавр-6К» на энергоблоках Курской АЭС», Тезисы докладов 9-го семинара по проблемам физики реакторов, Москва, МИФИ, б/о «Волга», 4...8 сентября 1995 г, т. 1, в. 3, с.96...97.

8. С.В. Бакулин, И.В. Дирков, А.С. Каминский и др., «Сравнительный анализ различных методов учета пространственно-временных эффектов при измерении реактивности», Вопросы атомной науки и техники, 1986, серия «Физика и техника ядерных реакторов», в.5. с.39...47.
9. П.В.Новицкий, И.А. Зограф «Оценка погрешностей результатов измерений», Ленинград, Энергоиздат, 1985 .
10. M.N. Babaytsev, et al., “The STEPAN Code for RBMK Reactor Calculation”, RRC KI, IAE-5660/5 (1993).

Рис.1. Высотное поле нейтронов на 3 блоке САЭС

- критика, ● - подкритика

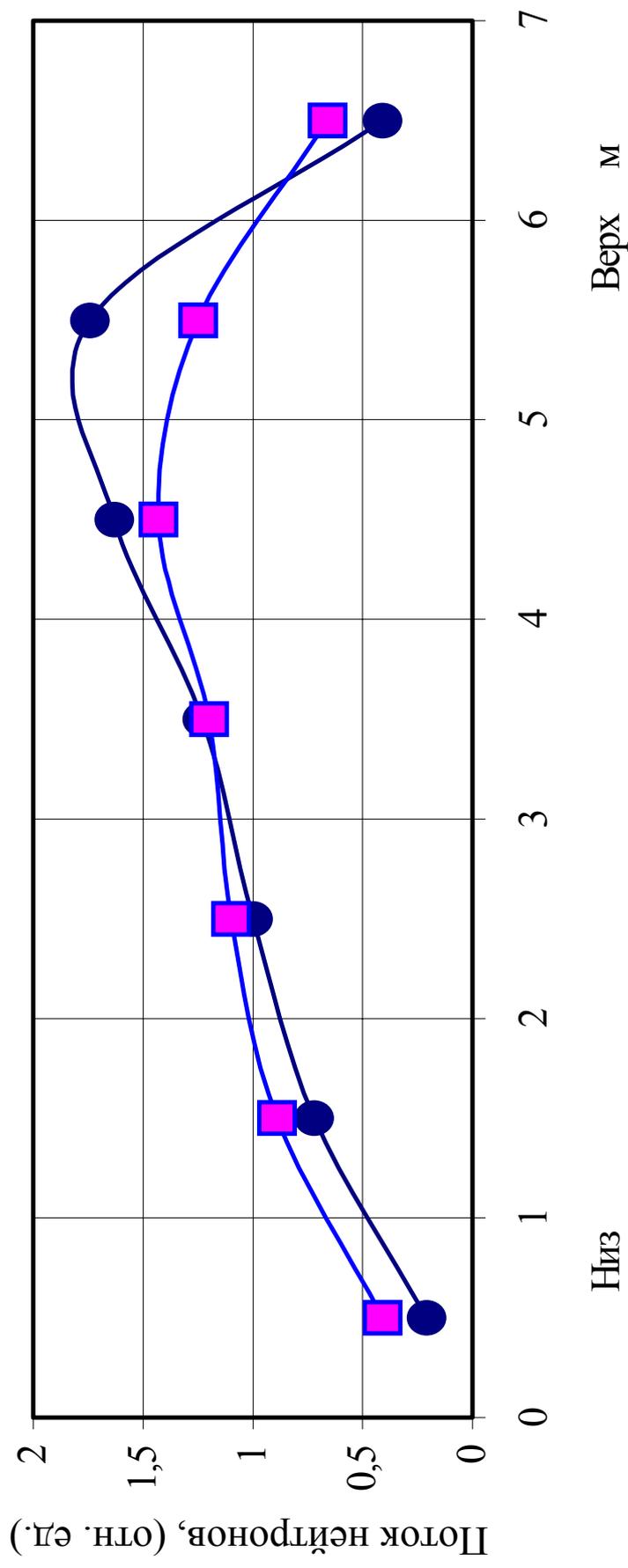


Рис.2. Изменение высотного поля нейтронов во времени при вводе на 3 блоке САЭС

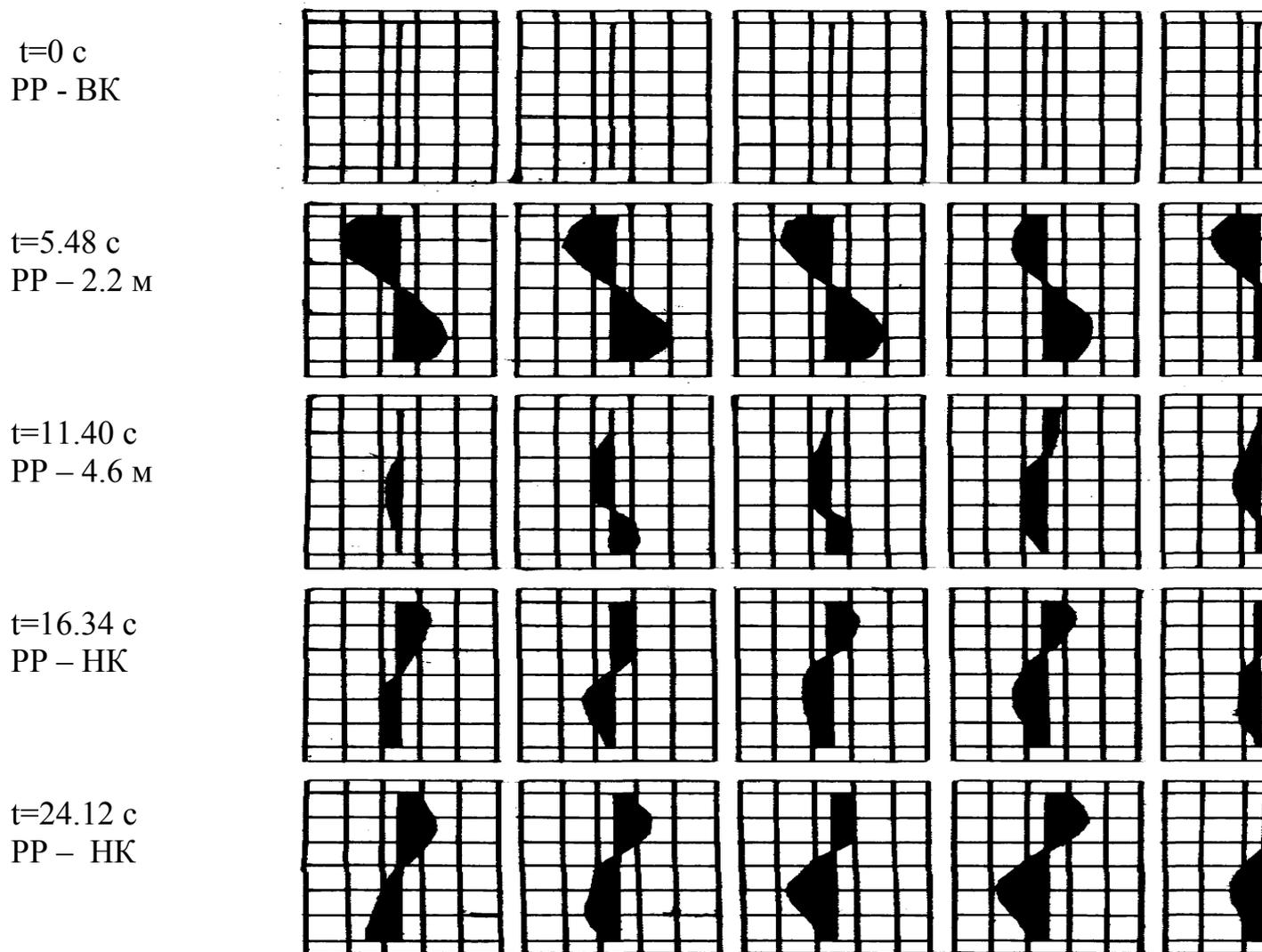


Рис.3. Максимальные отклонения реактивности при различном расположении n камер, определенные на критической сборке (А) и на реакторе 1-го блока Курской АЭС: ● - $\delta(\rho_{п})_{max}$, ■ - $\delta(\rho_{в\Sigma})_{max}$, ▲ - $-\delta(\rho_{пф})_{max}$

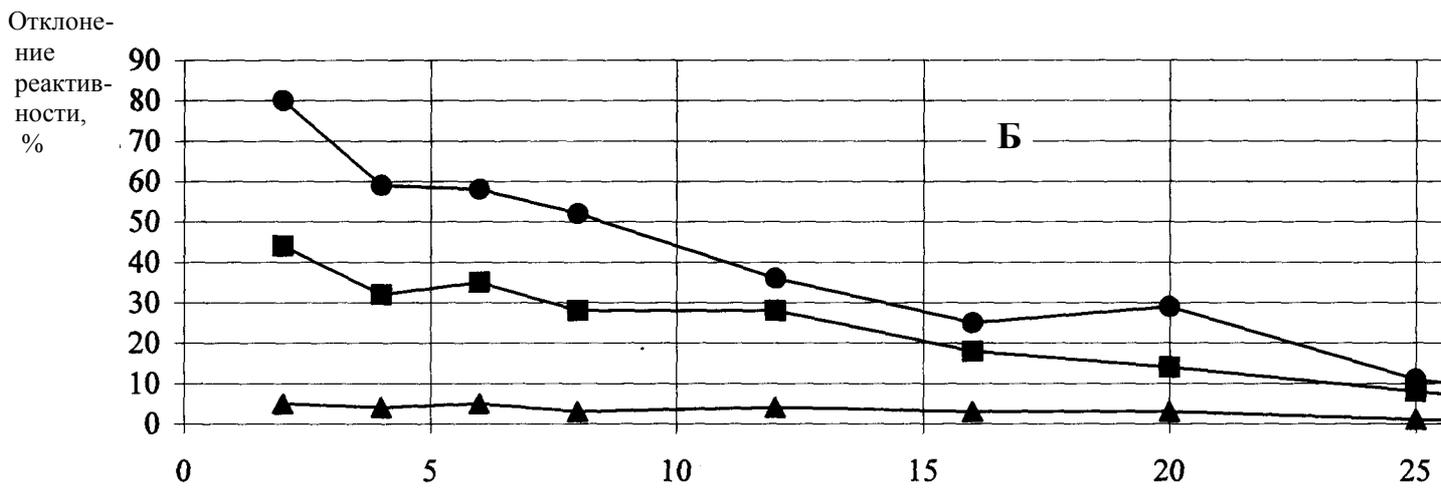
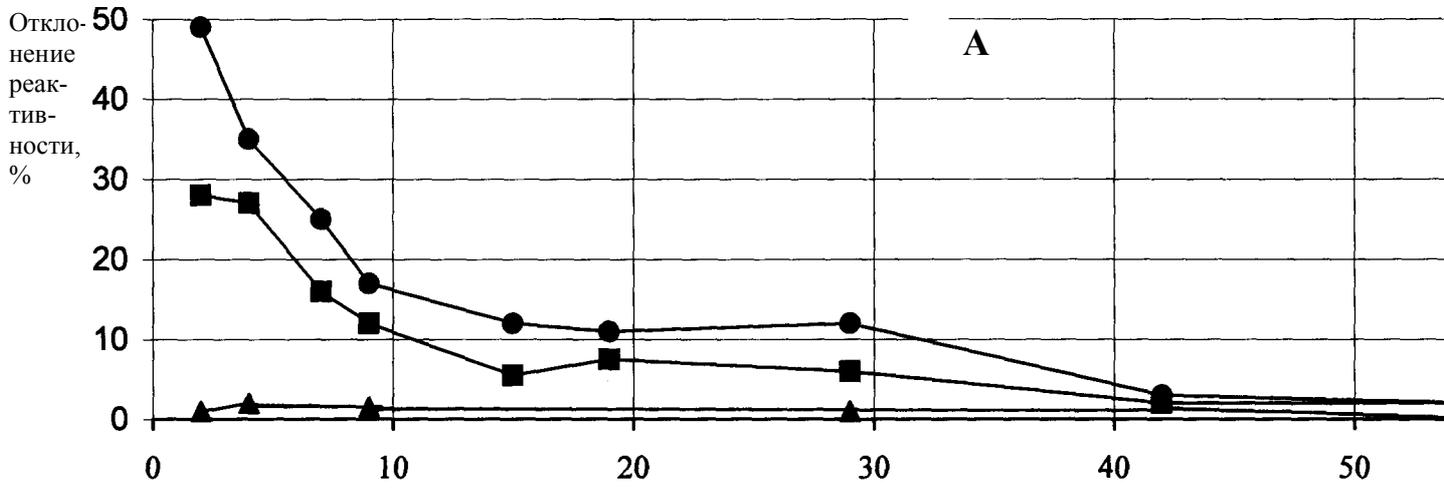
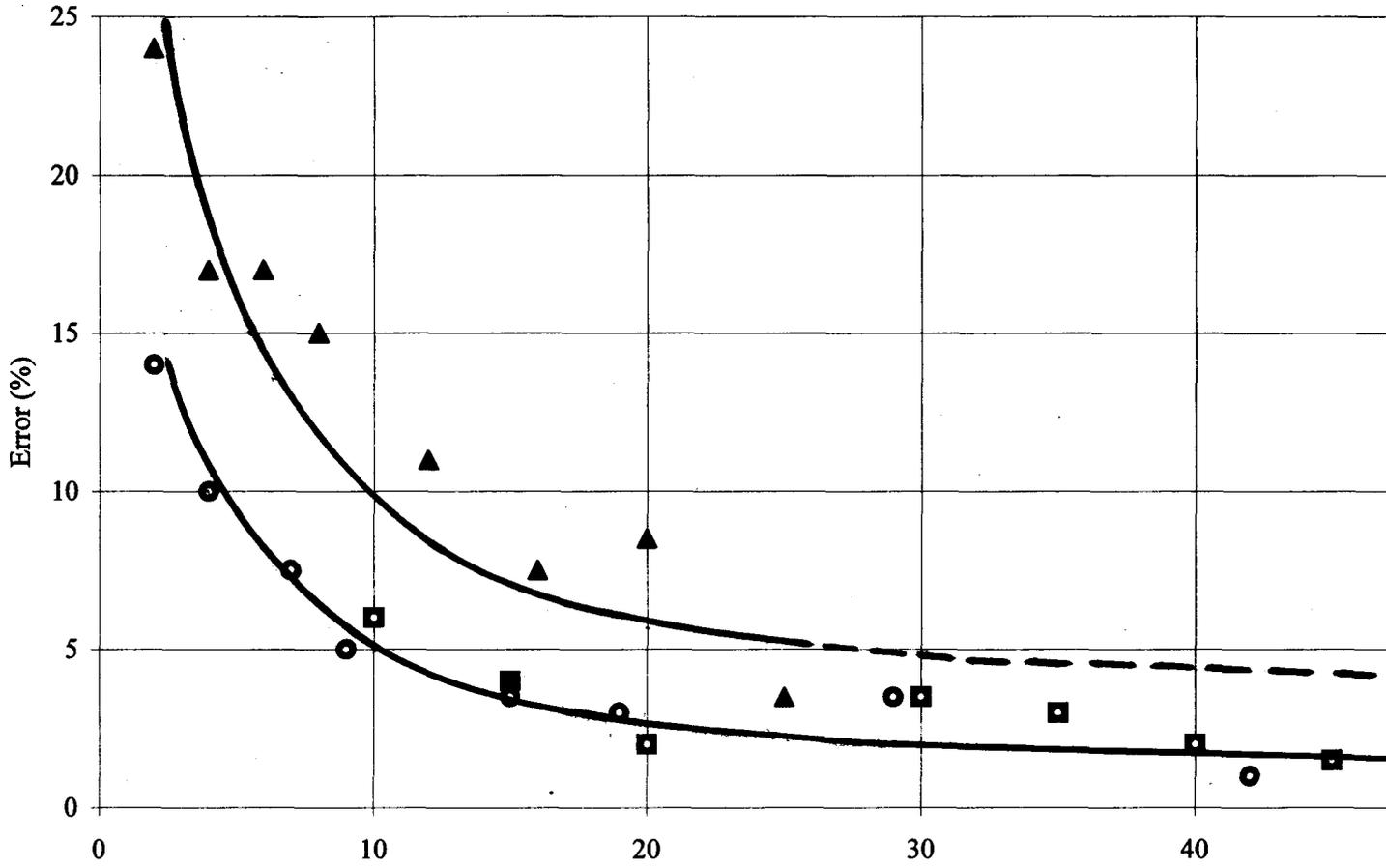


Рис. 4. Среднеквадратическая погрешность реактивности за счет пространственных эффектов для различных камер ● - критическая сборка, ■ - Смоленская АЭС, ▲ - Курская АЭС



KENTAVR Complexes - Universal Equipment for the Control and Measurement of RBMK Neutronic Parameters

A.N. Kuzmin, V.M. Kachanov, V.E. Jitarev, RRC "Kurchatov Institute"
G.N. Alexakov, V.P. Alferov, A.V. Kudryavtsev, V.A. Fedorov, MEPhI
G.P. Kirichenko, USC STC "Teploenergotekhnika"
vmkachanov @ chat.ru

Abstract

The paper presents a review of experimental data in a form of steady-state and transient neutron fields and reactivity effects performed in the RBMK critical facility and the RBMK reactors by "Kentavr" complexes. These results can be the ground for RBMK neutron codes validation. The results of experiments with large number of intracore chambers permit to evaluate a magnitude of a reactivity error from space effects for different number of employed chambers. For reduction of a space error of reactivity it is enough effectively using of the corrective factors, computed on the dynamic STEPAN code. The modification "Kentavr" equipment allows to supervise a period of neutron flux growth under the readings of intracore chambers during a reactor start-up.

Introduction

The determination of the passport neutronic characteristics of RBMK reactor, as a rule, is connected to measurement of reactivity. For this purpose in a critical condition a change of parameter is executed, the influence of which on reactivity is investigated, and introduced reactivity is determined as a result of processing of the neutron chambers readings by a solution of the inverse point kinetic equations [1]. The whole number of moments are essential for received result, for example, value of introduced disturbance, as well as number and location of chambers.

Long time analog reactimeter were used in RBMK reactor for measurement of reactivity by a method of the inverse point kinetic equations. At experiments during physical start-up of a "cold" reactor in reactimeter total current signal of four neutron chambers, installed in dry technological channels of the core, was processed. For measurement of reactivity of reactor working on power a total signal of standard chambers, located abroad to the core, were used. Since 1983 in RBMK-1500 reactor of the Ignalina nuclear power plant (NPP) hangers with three, placed on different height, chambers in each channel, have become to apply as standard side sensor. In further and at realization of measurements in stopped and cooled RBMK-1000 reactor a total signal of four three-chamber hangers, placed in dry channels of a core, have become to use. Such approach has become to give more authentic significances of reactivity, permitting better to take into account in measurements axial non-uniformity of neutron fields in a reactor.

In 1989 at physical start-up of a reactor of the Smolensk NPP unit 3 the "Kentavr-NPP" complex was used. The complex allowed to conduct measurements of neutrons flux density in 74 points of a core. A computer, included in a structure of this equipment, enabled operatively to conduct processing of current signals of neutron chambers for determination of reactivity significance and to use the various

approaches for the determination of reactivity without space effects. The principles, realized in "Kentavr-NPP" complex, were tested and fulfilled in the "Kentavr-CF" complex in current of several years up to it successfully used in critical facilities of the RRC "Kurchatov institute" [2, 3, 4]. Hereinafter the "Kentavr-NPP" complex was successfully used in experiments during stops of reactor in the Smolensk, the Leningrad and the Kursk NPP's [5]. For an opportunity of measurements in conditions of the intensive gamma-radiation, present after stop and cooling of a reactor, was entered impulse-fluctuation mode of 12 channels with chambers. Measurements in reactor working in power condition of the Kursk and the Smolensk NPP's with use of signals of silver beta-emission neutron sensors of standard power density distribution monitoring system (PDDMS) were conducted. At present time the new modifications of "Kentavr" complexes are used at realization of measurements of main neutronic parameters of reactor in a cold condition [6, 7]. Sensitive fission chambers, placed in central tubes of fuel assemblies, are applied as sensors.

The problem about creation of monitory system on the basis of the last modifications of a "Kentavr" equipment, enabling constantly to supervise a period of neutron flux growth during gain of reactor capacity up to a minimum controllable level, using intracore fission chambers, is considered. As well as earlier, this equipment will provide measurement of reactivity.

This report presents results of experiments, executed with help of "Kentavr" complexes in RBMK critical facility and RBMK reactor, as well as defines main principles of monitory "Kentavr" system.

1. "Kentavr" equipment in RBMK critical facility

"Kentavr-CF" complex is used since 1988 in a RBMK critical facility. This equipment permits to conduct measurement and processing of space distributions of a neutron flux density in a stationary condition and during the insertion of control rods or start up in a critical condition. The complex consists of 68 linear measuring channels with small-sized fission chambers and a computer. The measuring channels work in current mode and provide measurement of a neutron flux $\sim (10^5 \dots 10^7)$ n/(cm²·s). The fission chambers place in special channels in corners of cells of graphite stack. Two strings from 7 chambers are used for measurement of axial neutron field, and 56 chambers - for measurement of radial neutron field. At non-stationary measurements entered reactivity is calculated with the help of a computer as a result of the decision of inverse point kinetic equations in approximation of six groups of delay neutrons U-235. There is an opportunity to use the various approaches for the account space effects of reactivity [8]. A reactivity is determined on a total signal of chambers (ρ^Σ), on a total signal with a worth of neutrons, equal to neutron flux in initial critical condition (ρ^Σ_0) or in each current moment of time (ρ^Σ_t), as average reactivity of separate chambers ($\bar{\rho}$), as average reactivity of separate chambers after neutron field form change correction ($\bar{\rho}^\Phi$).

Results of reactivity measurement in a range from $+0.25\beta_{ef}$ up to $-4.25\beta_{ef}$ in the critical facility in a kind of a fragment of RBMK initial loading from 256 channels are represented in Table 1. The measurements were executed by a "Kentavr-CF" complex with use of the listed approaches and by a reactimeter, using a total signal of four chambers, located in side reflector. Mean-square errors of results are given in a kind $+0.246(2)=0.246\pm 0.002$. We shall note, that at measurement of

negative reactivity $\geq 1 \beta_{ef}$, the results, obtained on separate chambers of the core or reflector, can differ in 2...4 times.

Table 1. Measurement of reactivity (β_{ef}) by “Kentavr-CF” complex and reactimeter in critical facility

№	Kentavr-CF					Reactimeter
	$\rho_{\Sigma_t}^{\Sigma}$	$\rho_{\Sigma_0}^{\Sigma}$	$\rho_{\Sigma_t}^{\Sigma}$	$\bar{\rho}$	$\bar{\rho}^{\Phi}$	
1	+0.246(2)	+0.246(2)	+0.246(2)	+0.240(2)	+0.239(3)	+0.243(2)
2	-0.169(2)	-0.169(2)	-0.168(2)	-0.169(5)	-0.162(4)	-0.189(2)
3	-0.495(5)	-0.491(5)	-0.492(5)	-0.493(12)	-0.487(4)	-0.485(5)
4	-0.615(6)	-0.612(6)	-0.587(6)	-0.663(29)	-0.615(4)	-0.717(7)
5	-1.12(1)	-1.15(1)	-1.11(1)	-1.13(3)	-1.120(5)	-1.00(1)
6	-4.25(5)	-4.32(5)	-4.15(5)	-4.40(14)	-4.30(1)	-5.54(6)

It is visible, that all methods, used in “Kentavr-CF” complex for account of space effects, give close values of negative reactivity. The difference between significances of negative reactivity on the reactimeter and “Kentavr-CF” complex can reach $\approx(10...30)$ %. Positive reactivities are practically equal for all cases.

2. “Kentavr” equipment used in RBMK reactor

The “Kentavr-NPP” complex was made for realization of measurements during physical start-up of a reactor of the Smolensk NPP unit 3. This complex consisted of 74 linear measuring channels with small-sized fission chambers, 8 wide-range logarithmic channels with high-sensitiv fission chambers and computer. Fourty two linear measuring channels were used for 6 high strings with 7 chambers in each, and thirty two - with chambers for measurement of radial neutron fields. The linear measuring channels operated in a current mode and provided measurement of neutron flux $\approx(10^7...10^9)$ n/(cm²·s) at capacity of γ -radiation up to $\approx 0.5 \cdot 10^3$ r/hr. The logarithmic channels worked in a pulse-fluctuational mode and could be used for measurements in subcritical and critical conditions in a range of neutron flux $\approx(10...10^9)$ n/(cm²·s) in a γ -fields up to $\approx 10^5$ r/hr.

During physical start-up with the help of a “Kentavr-NPP” complex large volume of measurements was executed. At formation of initial loading of a reactor, measurements of steady-state neutron field in a critical condition were conducted. Measurement of axial steady-state neurton field for subcritical reactor was executed too. A maximum of axial subcritical neutron field was on ≈ 1 m higher of a critical maximum (fig. 1). Thus more non-uniformity on height, than in a critical condition is observed. Measurements of transient neutron fields were conducted at the insertion from a critical condition of various number of manual control rods (MCR), fast scram rods (FSR) and simultaneous moving on 0.5 m of all short control rods. The example of deformation (in a kind of a deviation from an initial kind in a critical condition)

axial neutron field at drop of 33 MCR is represented on a fig. 2. It is visible, that at entering of rods the axial field in the beginning displaces in the bottom part of a core, then comes back to an initial kind, and at the approach of rods to bottom end switch begins to displace upwards, accepting in due course the form of stationary subcritical neutron field.

Entered reactivity was calculated at transient measurements with the help of a computer, using a method realized on RBMK critical facility. The significances of reactivity on separate chambers of a “Kentavr-NPP” complex could differ in 2...3 times and at data processing the same approaches for the account of space effects were used. Measurements of reactivity with the help of reactimeter were simultaneously conducted, on which total signal of four three-chambers hangers installed in a core applied. Some results of measurements of a subcriticality at dropping of extracted MCR’s and the remainder dropping of FSR’s are listed in Table 2. For data, obtained on “Kentavr-NPP” complex, mean-square errors of reproducibility of results are given, for reactimeter - an accepted methodical error of measurement.

Table 2 . Measurement of subcriticality (β_{ef}) by “Kentavr-NPP” complex and reactimeter in the Smolensk NPP unit 3.

№	Kentavr-NPP					Reactimeter
	$\rho_{\Sigma t}^{\Sigma}$	$\rho_{\Sigma 0}^{\Sigma}$	$\rho_{\Sigma t}^{\Sigma}$	$\bar{\rho}$	$\bar{\rho}^{\phi}$	
1	2.04(2)	2.04(2)	2.03(2)	2.08(4)	2.03(1)	1.9(1)
2	2.81(3)	2.82(3)	2.79(3)	2.77(5)	2.80(1)	2.7(1)
3	5.49(5)	5.78(5)	5.43(5)	5.62(21)	5.48(3)	5.6(2)
4	6.45(6)	7.04(6)	6.73(6)	6.29(17)	6.48(3)	6.4(3)
5	4.80(5)	4.80(5)	4.72(5)	5.05(19)	4.79(1)	4.1(2)
6	5.42(5)	5.57(5)	5.48(5)	5.41(14)	5.45(2)	5.0(2)
7	10.87(11)	11.75(12)	10.83(11)	-	-	9.8(4)

It is visible, that the approaches, used in “Kentavr-NPP” complex for account of space effects, give close results. Reactimeter with 12 intracore chambers gives satisfactory concurrence with results of a “Kentavr-NPP” complex at entering of MCR’s (experiments №№1...4) - difference not more than $\approx 7\%$. But at the remainder dropping of FSR’s (experiments №№5...7) differences reaches $\approx (9...17)\%$.

In 1991 the “Kentavr-NPP” complex executed measurements of efficiency of 21 FSR’s in the Kursk NPP unit 1, working on capacity $\approx 50\%$. Signals of silver beta emission neutron sensors of PDDMS were used in these measurements. The special computational program permitted to take into account inertial component of sensor signals in view of various burnup of a silver isotope and operatively to receive

real data about neutron field deformation in a time. At realization of experiments in a “Kentavr-NPP” complex were entered: a total signal of all 128 radial power density sensors (RPDS), separate signals of 32 RPDS’s, as well as separate signals of 4 standard side ionization chambers (SIC). Two other SIC’s were used with reactimeter. At calculation of reactivity a technique of an inverse point kinetic equation in approach of 6 groups of delay neutrons U-235 was used. In this case for a fuel with burnup ≈ 11 MW·day/kgU such approach systematically overestimates a subcriticality on ≈ 3.6 %, that is stowed in an accepted error of reactivity measurement, equal $\approx 5\%$. The difference of reactivity significances on separate RPDS’s reached ≈ 3 times, and on separate SIC’s ≈ 30 % and at data processing the approaches applied earlier for the account of space effects were used. Besides as the experiments were conducted on capacity of ≈ 50 %, into received significances of reactivity the power feedback correction was entered. Results of measurement of efficiency of 21 FSR’s by a “Kentavr-NPP” complex and reactimeter before (ρ) and after (ρ_{fb}) entering of the power feedback correction are submitted in Table 3. Mean-square errors of results reproducibility are given.

Table 3. Measurement of efficiency (β_{ef}) of 21 FSR’s (before/under introduction a power feedback correction) in the Kursk NPP unit 1.

Number, type of chambers	Kentavr -NPP					Reactimeter
	$\rho^\Sigma / \rho^\Sigma_{fb}$	$\rho^\Sigma_0 / \rho^\Sigma_{0,fb}$	$\rho^\Sigma_t / \rho^\Sigma_{t,fb}$	$\bar{\rho} / \bar{\rho}_{fb}$	$\bar{\rho}^\varphi / \bar{\rho}^\varphi_{fb}$	
128 RPDS	1.67(9)/ 1.84(8)	-	-	-	-	-
32 RPDS	1.67(10)/ 1.84(6)	1.72(10)/-	1.65(10)/-	1.76(10)/-	1.67(2)/ 1.85(8)	-
4 SIC	-	-	-	1.50(9)/ 1.68(9)	1.73(5)/ 1.86(11)	-
2 SIC	-	-	-	-	-	1.46(5)/ 1.64(1)

It is visible, that efficiency of FSR’s, determined in a “Kentavr-NPP” complex on a total signal of 128 RPDS’s, on a signal 32 RPDS’s, using of the various space effects corrections, and on signals of four SIC after neutron field form change correction are practically equal among themselves. The account of feedback on capacity increases efficiency of FSR’s on $\approx (7...12)$ % and still more pulls together results. Significances, received on reactimeter, on $\approx 14\%$ less than results of a “Kentavr-NPP” complex with RPDS’s and within the limits of an error coincide with result on 4 SIC’s of a complex before neutron field form change correction.

In all three series of experiments with number of neutron chambers ≥ 70 considered methods of space effects account give close results. Usually, ≤ 12 neutron chambers at measurement of reactivity on a reactor are used. Not always these chambers are placed within a core. Under such conditions the total signal of chambers is not proportional to complete capacity of a reactor and the contribution of space

effects for all considered methods grows. The valuation of a reactivity error from space effects depending from number of neutron chambers is given in following section.

3. Reactivity error from space effects

The submitted results of experiments, executed in the RBMK critical facility, Smolensk and Kursk NPP's, were used for valuation of a space component of reactivity error depending from number of used chambers. The analysis of results of a subcriticality measurement by the different number of chambers was conducted for this purpose at various variants of an arrangement of the same number of chambers in a core (Table 4).

Table 4. Variants for estimation of space effect error of reactivity.

Experiment	Number inserted control rods	Subcriticality, β_{ef}	All number of chambers	Number of variants with different number of chambers (number of chambers)	Number of variants location of chambers
Critical facility	15	4.3	68	15(2-68)	2-12
Smolensk NPP	33	2.0	69	11(10-65)	5-6
Kursk NPP	21	1.8	128	9(2-32)	1-10

Three types of parameters were calculated:

$\delta\rho_n$ - range of possible significances of reactivity by use of total signal of n chambers (ρ_n^Σ) relatively reactivity significance averaged on all variants of an arrangement of these chambers ($\bar{\rho}_n^\Sigma$);

$\delta\rho_{n\Sigma}$ - deviation of reactivity on the total signal of n chambers (ρ_n^Σ) from reactivity on a total signal of all being present chambers (ρ^Σ);

$\delta\rho_{n\phi}$ - deviation of average reactivity on n chambers after neutron field form change correction (ρ_n^0) from reactivity on a total signal of all being present chambers (ρ^Σ).

For each number of chambers maximum significances $\delta\rho_n$, $\delta\rho_{n\Sigma}$, $\delta\rho_{n\phi}$ were determined among all variants of chambers arrangement. The received results for the critical facility and Kursk NPP are submitted on fig.3. The results for the Smolensk NPP practically repeat dependences received for a critical facility. It is visible, that by use of four three-chambers hangers a range of possible reactivity significances $(\delta\rho_n)_{max}$ can make $\approx 15\%$ for cold fresh loading and $\approx 40\%$ for reactor working on capacity with burnup loading. Thus a maximum deviation of reactivity on a total signal of 12 chambers from reactivity on a total signal of all chambers $(\delta\rho_{n\Sigma})_{max}$ makes $\approx 10\%$ for cold nonburnup loading and $\approx 25\%$ for burnup reactor on capacity. On the first sight, the method of the account of space effects with the help of the neutron field form change correction is rather effective. Value $(\delta\rho_{n\phi})_{max}$ in all

considered cases for cold nonburnup loading does not exceed $\approx 2\%$, and for burnup reactor on capacity - $\approx 5\%$. But condition of effective application of a method of the neutron field form change correction is an opportunity of chambers signals normalization on a signal proportional to an integrated flux of neutrons in a core, in considered cases on a signal of ≥ 70 chambers connected to a “Kentavr” complex. At experiments on a stopped cooled reactor the PDDMS sensors do not work and consequently the realization of this condition is not possible. When it is possible, i.e. by working PDDMS for reception of the same result is reasonably to use simple a total signal of these sensors.

Using of value $(\delta\rho_n)_{\max}$ and approach offered in work [9] mean-square space errors at measurement of reactivity on a total signal of chambers were determined. The received results are submitted on fig. 4. It is visible, that the results for the RBMK critical facility with a fragment of initial loading of a reactor from 256 channels and cold reactor of the Smolensk NPP with fresh loading of a core are close among themselves. For reactor of the Kursk NPP working on power with burnup loading the mean-square space error is increased in ≈ 2 times. We shall remind, that at processing of the last results restoration of inertial component of PDDMS sensors signals was conducted and the power feedback correction was entered. For reception of the mean-square space error of $\approx 5\%$ needs to use ≈ 10 chambers for a cold nonburnup reactor and $\approx 25\text{...}30$ chambers for a burn-up reactor on capacity. By use of a total signal of four three-chambers hangers the mean-square space component of reactivity error can make from $\approx 4\%$ up to $\approx 11\%$ depending on a reactor condition. We shall note, that the all valuations indicated in given section are made for an intracore arrangement of chambers.

4. Calculation correction factors on space effects

Calculation correction factors received by the non-stationary codes are reasonably effective application for decrease of space effect errors [3]. Such code should directly simulate experiment, i.e. to define reactivity on calculation changes of neutron flux in the locations of chambers, as well as to define reactivity on an integrated neutron flux of all core. For corrective action on space effects it is necessary experimental value of reactivity to multiply on a factor in a kind of the ratio of computational reactivities on an integrated signal and signal of a chamber. For RBMK reactor such approach is realized on the basis of the non-stationary code STEPAN [10]. Results of use of STEPAN code for the computational corrective action on space effects at repeated physical start-up of the first block of the Kursk NPP after replacement of technological channels in 1997 are indicated in Table 5. The measurement of reactivity was executed with the help of a “Kentavr” complex, used total signal of 6 intracore neutron chambers, and reactimeter, operated on a total signal of 3 SIC’s.

It is visible, that the initial difference of experimental significances of a subcriticality on an intracore (“Kentavr”) and side (reactimeter) chambers makes $\approx (25\text{...}40)\%$. The computational corrective action on space effects reduces difference up to $\approx (7\text{...}20)\%$. The computational subcriticalities on an integrated neutron flow of an all core are, as a rule, between corrected experimental significances.

Table 5. Experimental and calculation subcriticalities (β_{ef}), results introduction a calculation space effect correction for Kursk NPP unit 1.

№	Experiment		Calculation			Experiment with calculation correction	
	Kentavr	Reactimeter	Kentavr	Reactimeter	Integral Reactimeter	Kentavr	Reactimeter
1	2.22	1.6	2.09	1.62	2.30	2.44	2.27
2	5.93	4.75	5.37	5.08	6.07	6.70	5.68
3	6.60	4.9	5.76	5.12	6.32	7.24	6.05
4	8.96	7.0	7.46	6.62	8.62	10.35	9.11

Hereafter for operative reception of experimental results with the computational correction factor on space effects by the STEPAN code it is possible a computer of a “Kentavr” complex to use.

5. Monitory KENTAVR system

In 1999 at a start-up on capacity of a reactor of the fourth block of the Kursk NPP operation of fast-acting scram system has taken place. Computational modeling of control rods extraction at a reactor start-up in a critical condition has shown, that at the chosen order of rods extraction, maximal allowable significance of a radial non-uniformity factor was essentially exceeded. The last extracted rod had anomaly large “weight”, that has resulted in large speed of the introduction of positive reactivity. Thus the value of a period of neutron flux growth in a region of a neutron field maximum was considerably less, than in the locations of sensor of regular devices of emergency protection on power increase rate. For exception of similar situations was entered the whole number of organizational measures. As a mean, enabling constantly to supervise a situation during a reactor start-up on a minimum controllable level of capacity a monitoring system (MS) on the basis of a block of chambers signals processing (BCSP), tested earlier in last models “Kentavr” is offered.

It is supposed, that the equipment MS-KENTAVR will consist of three independent control channels and personal computer. Each control channel will provide the gathering and processing of signals from six hangers of chambers, located in central pipes of fuel assemblies. The hanger will incorporate one ionization chamber PIC-5, preserving serviceability up to 300 °C. Using of 18 neutron chambers will allow to decrease a mean-square space component of error of reactivity measurement up to $\approx 7\%$. Each control channel will consist of a block BCSP and controller with devices, showing minimum period of neutron flux growth on six chambers. The personal computer will execute the gathering, processing and storage of the information. In a structure of a system is planned to include a sound indicator of run-away. The MS-KENTAVR will be certificated and supplied a technique and means for periodic check.

The conclusion

A use in experiments in the critical facility and RBMK reactor of multichannel complexes has allowed to receive experimental data on steady-state and transient neutron fields and reactivity effects. On the basis of these results it is possible to conduct validation of the computational codes.

As a result of the analysis of these results a space component of reactivity error depending from number of used intracore chambers was appreciated. It is shown, that by use of a regular technique - total signal of four three-chambers hangers - the mean-square space component of reactivity error can reach $\approx 11\%$.

For reduction of a space error of reactivity it is enough effectively using of the corrective factors, computed on the dynamic STEPAN code. For increase operativeness of computation it is possible to use a computer of a "Kentavr" complex.

Description of eighteen channel monitoring and measuring systems on the basis of an equipment "Kentavr", enabling to supervise a period of neutron flow growth under the readings of intracore chambers during a reactor start-up on a minimum controllable level of capacity is given. Use of eighteen chambers will allow to decrease mean-square space component of reactivity error up to $\approx 7\%$.

References.

1. Yu.A. Kazansky, E.S. Matusevich "Experimental Methods of Reactor Physics ", Moscow, Energoizdat, p. 93 (1984).
2. G.N. Alexakov, A.V. Kudryavtsev, A.N. Kuzmin, et.al., "Kentavr-System for Neutronics Experiments in Uranium-Graphite Critical Facilities", Atomnaya Energia, 66, 3, 211 (1989).
3. V.E. Jitarev, V.M. Kachanov, A.N. Kuzmin, "About Increase of Adequacy Measured and Calculated Reactivity Effects ", Proc. 7 All-Union Seminar on Reactor Physics Problems, p.163, Moscow, Russia (1991).
4. E.V. Burlakov, A.V. Glembotsky, G.B. Davydova, et. al., "An Analysis of the Experiments with Erbium for the RBMK Design", ANS International Topical Meeting on Advances in Reactor Physics and Mathematics and Computation into the Next Millennium, May 7÷12, 2000, Pittsburgh, USA, Proceedings.
5. V.E. Jitarev, V.M. Kachanov, A.N. Kuzmin, " Measurement the Reactivity of RBMK Type Reactor Regarding Space Kinetic Effects ", Proc. 8 Seminar on Reactor Physics Problems, v.2, p.44, Moscow, Russia (1993).
6. G.N. Alexakov, V.A. Fedorov, A.V. Kudryavtsev, et.al., "Kentavr-6K" System for RBMK Physical Data Acquisition and Analysis", Proc. 8 Seminar on Reactor Physics Problems, v.1, p.195, Moscow, Russia (1993).
7. G.N. Alexakov, A.V. Kudryavtsev, Yu.A. Lapshikov, et.al., "Experience of Application the Automatic Physical Data Acquisition and Analysis System

“Kentavr-6K” on Kurskaya NPP”, Proc. 9 Seminar on Reactor Physics Problems, v.1, p.96, Moscow, Russia (1995).

8. S.V. Bakulin, et al., “The comparative analysis of various methods of the account of space-time effects at measurement of reactivity”, Questions of nuclear science and engineering, series ”Physics and engineering of nuclear reactor”, v.5. p.39...47, 1986.
9. P.V.Novitsky, I.A. Zograf, “Valuation of errors of measurement results”, Leningrad, Energoizdat, 1985.
10. M.N. Babaytsev, et al., “The STEPAN Code for RBMK Reactor Calculation”, RRC KI, IAE-5660/5 (1993).

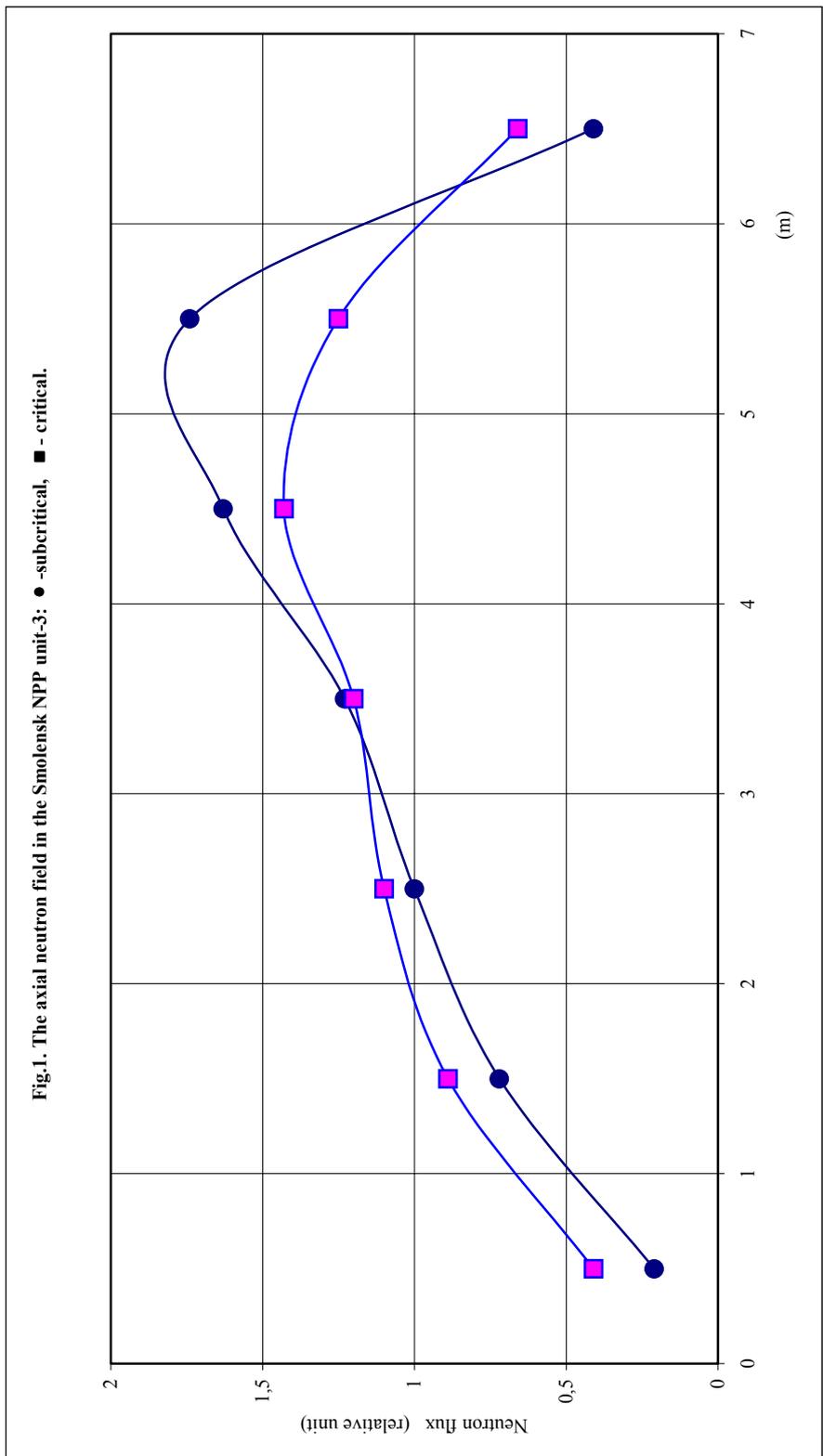
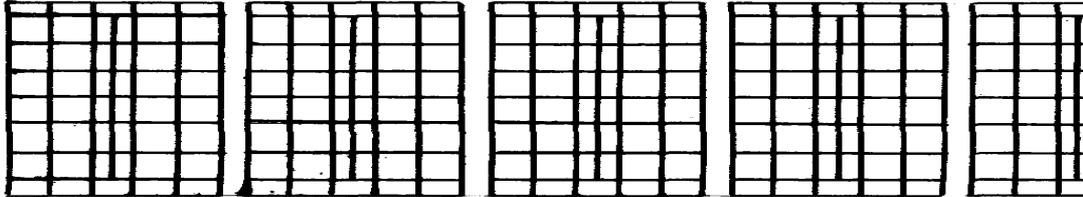
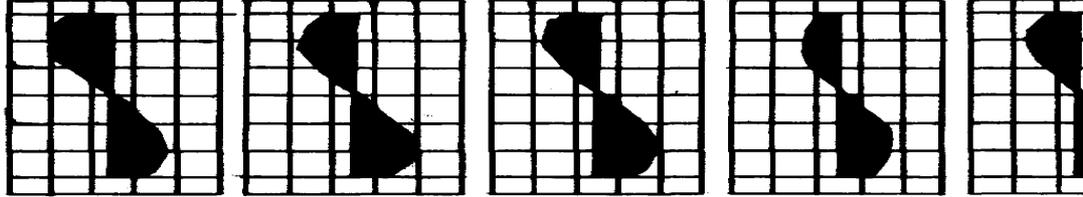


Fig. 2. Deformation of the axial neutron field during time under insertion of control rods in t

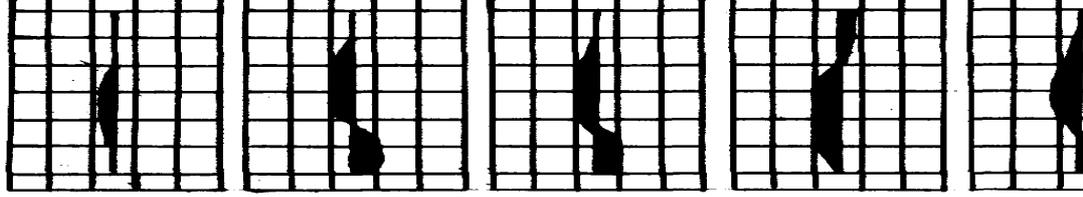
t=0 sec.
CR – TES



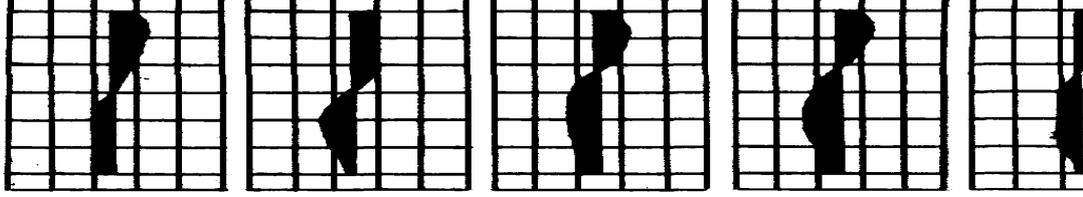
t=5.48 sec.
CR – 2.2 m



t=11.40 sec.
CR – 4.6 m



t=16.34 sec.
CR – BES



t=24.12 sec.
CR – BES

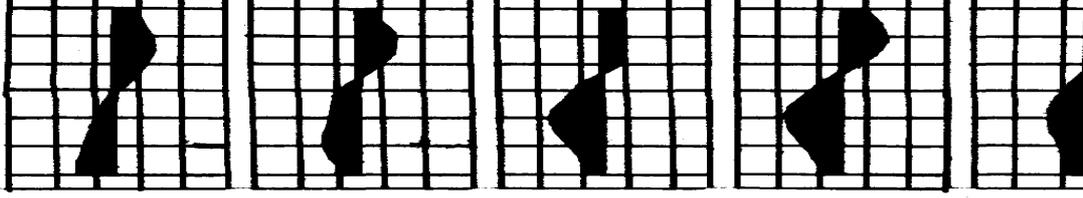


Fig.3. Maximum deviation of reactivity for different disposition n chambers determined in the facility (A) and in the Kursk NPP (B): ● - $\delta(\rho_n)_{max}$, ■ - $\delta(\rho_n)_{\Sigma}$

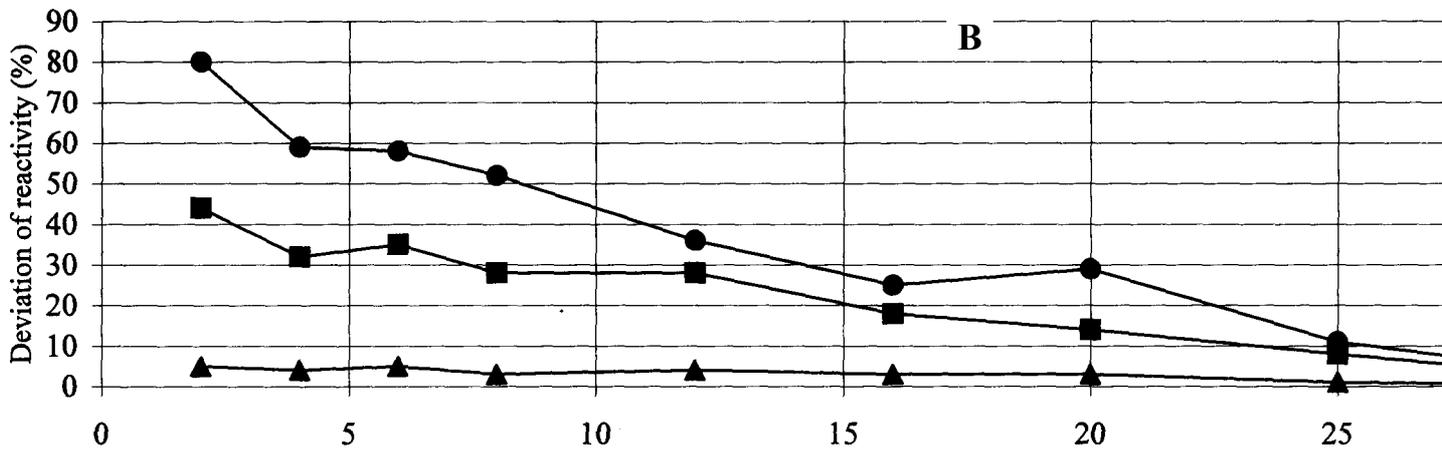
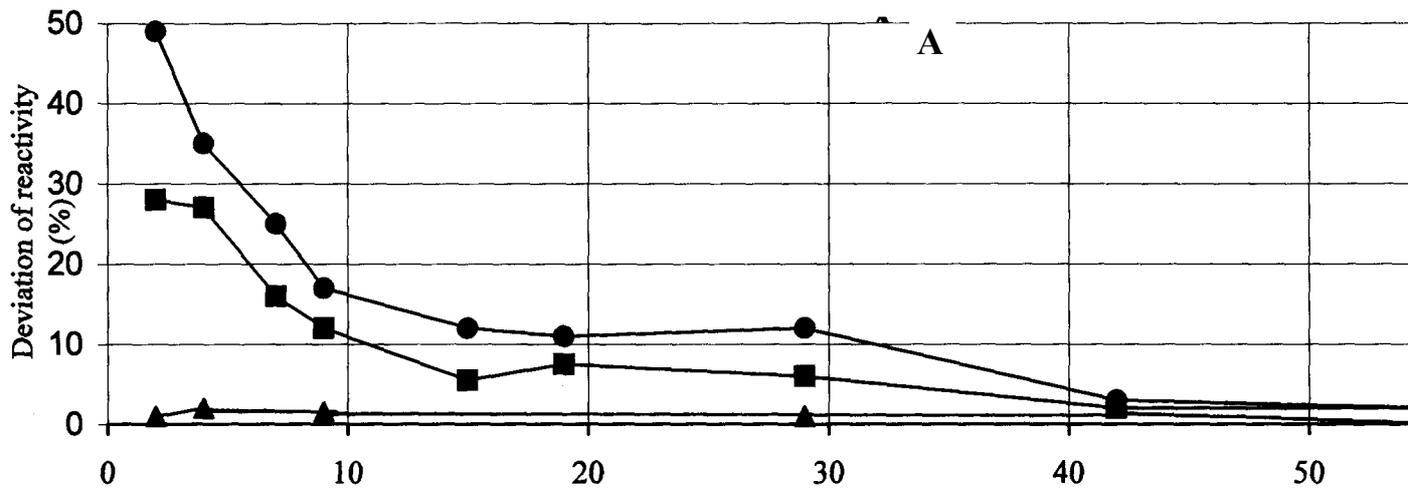


Fig.4. The mean square error of reactivity from space effects for different num

● - critical facility, ■ - Smolensk NPP, ▲ - Kursk NPP

